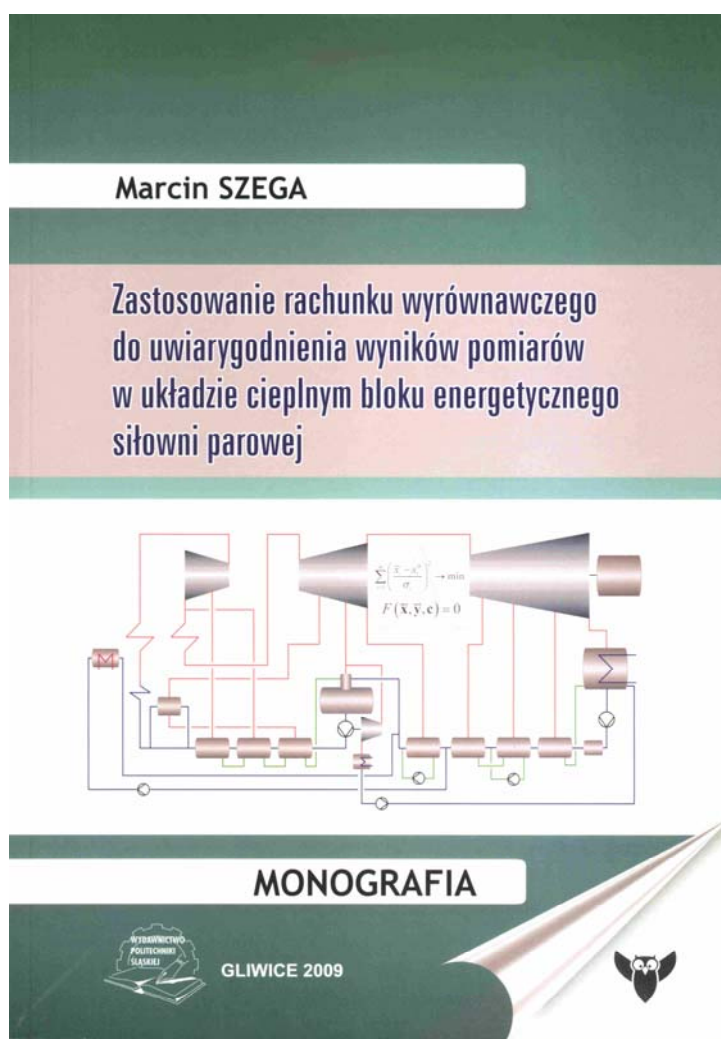


Marcin Szega

Zastosowanie rachunku wyrównawczego do uwiarygodnienia wyników pomiarów w układzie cieplnym bloku energetycznego siłowni parowej

(Monografia habilitacyjna nr 193. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009. ISBN 978-83-7335-554-5)



Streszczenie

Do niezawodnej pracy urządzeń bloku energetycznego wymagana jest odpowiednia liczba punktów pomiarowych informujących o stanie urządzeń i przebiegu zachodzących procesów konwersji energii. Stąd istotnemu zwiększeniu w rozproszonych systemach sterowania uległa informacja pomiarowa dotycząca potrzeb bieżącej technicznej kontroli eksploatacji. Umożliwia ona w wielu przypadkach stosowanie zaawansowanych metod pozwalających na przeprowadzenie uwiarygodnienia pomiarów obciążonych nieuniknionymi błędami, za pomocą metod rachunku wyrównawczego. Wystąpienie, istotnej z punktu widzenia metod tego rachunku, nadmiarowej informacji pomiarowej w układzie cieplnym bloku energetycznego nie jest jednak jedynym warunkiem, którego spełnienie umożliwia uzyskanie zadowalających wyników uwiarygodnienia danych pomiarowych. W bilansowaniu układu cieplnego bloku energetycznego występuje bowiem duże zróżnicowanie problemów wyrównawczych. Schematyczne zastosowanie metod rachunku wyrównawczego nie prowadzi w tym przypadku do uzyskania poprawnych wyników obliczeń z punktu widzenia fizyki zachodzących zjawisk. W rozwiązywanym zagadnieniu metody te musiały zostać połączone z wiedzą o zachodzących procesach konwersji energii.

Wykorzystanie danych pomiarowych z rozproszonych systemów sterowania, jako danych wejściowych do obliczeń w komputerowych systemach technicznej kontroli eksploatacji, stwarza określone problemy związane z możliwością występowania błędów grubych pomiarów związanych z awarią lub uszkodzeniem toru pomiarowego. Z uwagi na to, że dane wejściowe do obliczeń wyrównawczych nie mogą być obciążone błędami grubymi, przeprowadzono analizę oraz ocenę przydatności metod kontroli założonej dokładności pomiarów oraz detekcji i identyfikacji błędów grubych pomiarów w warunkach wykorzystywania danych pomiarowych z rozproszonych systemów sterowania. Analizy te wykazały niejednoznaczność uzyskiwanych wyników testów statystycznych dla zadań wyrównawczych o nieliniowej postaci równań warunków i nieprzydatność tych metod w przypadku identyfikacji konkretnego błędu grubego pomiaru. Stąd do detekcji i identyfikacji błędów grubych pomiarów zaproponowano wykorzystanie opracowanego symulacyjnego modelu matematycznego procesu. Zastosowanie modelu symulacyjnego do identyfikacji błędów grubych pomiarów zapewnia podwójną korzyść w systemie komputerowym. Wartość zidentyfikowanego pomiaru obciążonego błędem grubym może zostać zastąpiona w obliczeniach wyrównawczych wartością wynikającą z modelu, umożliwiając w ten sposób ciągłość przeprowadzanych obliczeń wyrównawczych szczególnie w analizach *on-line*.

W zakresie doskonalenia numerycznej metody rozwiązania zadań wyrównawczych o nieliniowej postaci układu równań warunków przedstawiono metody, których zastosowanie umożliwia poprawienie numerycznej stabilności uzyskiwania wyników obliczeń oraz zbieżności obliczeń iteracyjnych. W przypadku zastosowania do rozwiązywania zadań wyrównawczych metod programowania nieliniowego przedstawiono trudności bezpośredniego wyznaczenia w tym przypadku macierzy kowariancji pomiarów po uwiarygodnieniu. W celu porównania obu metod rozwiązania zadań wyrównawczych opracowano przykład obliczeniowy, a uzyskane wyniki obliczeń w postaci wektorów uwiarygodnionych wyników pomiarów poddano ocenie statystycznej. Ocena ta pokazała, że

obliczona różnica wektorów wyników pomiarów po uwiarygodnieniu dla analizowanych metod rozwiązania zadania wyrównawczego jest istotnie mniejsza od wartości krytycznej testu statystycznego. Wynika stąd brak statystycznej istotności różnicy analizowanych wektorów wyników obliczeń wyrównawczych. Z przeprowadzonych analiz nasuwa się jednoznaczny wniosek, że z uwagi na bezpośrednią możliwość obliczenia macierzy kowariancji wyników uzgadniania w metodzie z wykorzystaniem nieoznaczonych czynników *Lagrange'a* i stwierdzonego braku statystycznej istotności różnicy wyników uzgadniania, metoda ta wydaje się być bardziej przydatna w numerycznych obliczeniach zadań wyrównawczych.

Wykazano, że uzyskanie zadowalających wyników uwiarygodnienia pomiarów w układzie cieplnym bloku energetycznego jest możliwe jedynie w przypadku zastosowania uogólnionej metody uzgadniania wykorzystującej informację o niepewności wstępnego oszacowania wielkości niewiadomych. Opracowano metodykę wstępnego oszacowania wielkości niemierzonych i pomiarowo niedostępnych oraz niepewności tego oszacowania. Wykazano istotny wpływ wstępnego oszacowania wartości entalpii właściwej pary wylotowej z turbiny kondensacyjnej do skraplacza oraz niepewności tego oszacowania na wyniki uzgadniania. Dla potrzeb wstępnego oszacowania wartości entalpii właściwej pary wylotowej z turbiny kondensacyjnej do skraplacza przeprowadzono analizę przydatności zaproponowanych metod tego oszacowania. Metodą najbardziej przydatną z uwagi na dokładność estymacji oraz mniej złożony algorytm w porównaniu do pozostałych analizowanych metod okazała się metoda wykorzystująca informację o adiabatycznej sprawności wewnętrznej rozprężania pary. Do oceny niepewności oszacowania entalpii pary wylotowej z turbiny wykorzystano informację o granicznej wartości stopnia suchości pary wylotowej do skraplacza oraz z wykorzystaniem przewidywanej linii rozprężania pary w obszarze pary mokrej z uwzględnieniem efektu przechłodzenia. Opracowane metody zostały zilustrowane za pomocą opracowanych przykładów obliczeniowych.

Zastosowanie symulacyjnego modelu matematycznego procesu do detekcji i identyfikacji błędów grubych pomiarów nie daje całkowitej pewności, że dla losowych wartości zmiennych pomiarowych z rozproszonego systemu sterowania bloku uzyskane wyniki po obliczeniach uzgadniających nie będą sprzeczne z zasadami termodynamiki. Zastosowana uogólniona metoda uzgadniania pozwoliła model walidacyjny rozwiązywanego zadania wyrównawczego, obejmujący z zasady równania bilansów substancji i energii, uzupełnić dodatkowymi równaniami opisującymi zachodzące procesy konwersji energii. W celu spełnienia zasady wzrostu entropii rozbudowano układ równań warunków – model walidacyjny o dodatkowe równania umożliwiające spełnienie tej zasady. Jako dodatkowe równania modelu walidacyjnego zastosowano równania przelotności, sprawności wewnętrznych oraz równania wynikające z przebiegu izobar na wykresie $i-s$ dla grup stopni turbiny, równania *Peclet'a* i równania spadków ciśnienia pary dolotowej do wymienników regeneracyjnych oraz przechłodzenia skroplin z wymienników. Rozbudowa modelu walidacyjnego o dodatkowe równania przyniosła ponadto wymierne korzyści dotyczące zmniejszenia niepewności pomiarów po uwiarygodnieniu. Opracowaną metodykę zilustrowano na przykładzie uwiarygodnienia pomiarów w układzie cieplnym przykładowego bloku energetycznego wyposażonego w krzyżowy układ wysokoprężnej regeneracji ciepła.

Wykorzystując algorytm rachunku wyrównawczego, opracowano metodykę optymalnej lokalizacji nadmiarowych pomiarów w procesie cieplnym z zastosowaniem metod programowania stochastycznego. Z uwagi na pomiary różnych wielkości fizycznych nie jest możliwe w tym przypadku stosowanie jako funkcji celu minimalizowania sumy wariancji lub odchyłeń standardowych pomiarów. Podejście to jest możliwe tylko w przypadku pomiarów jednej wielkości fizycznej (najczęściej przepływu substancji) i jest opisywane w literaturze dotyczącej zagadnień inżynierii chemicznej. Stosowanie sumy względnych wariancji pomiarów z uwagi na przedstawiony dowód jej charakterystycznej własności również nie jest możliwe. Zmiana statusu wielkości niemierzonej (ale dostępnej pomiarowo) na status wielkości pomiarowej nie zmienia bowiem wartości tej sumy. W analizowanym problemie celowe wydaje się przeprowadzanie optymalizacji lokalizacji dodatkowych nadmiarowych pomiarów, zapewniającej zwiększenie wiarygodności wskaźnika energochłonności procesu lub wielkości mającej bezpośredni wpływ na wartość tego wskaźnika. Opracowaną metodykę zilustrowano przykładem obliczeniowym optymalnego doboru lokalizacji dodatkowych nadmiarowych pomiarów zapewniającej minimalną wartość złożonej niepewności standardowej strumienia ciepła zużywanego przez turbozespół.

Oryginalne rozwiązania oraz indywidualny wkład i osiągnięcia autora w prezentowanej pracy można podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa dotyczy osiągnięć mających znaczenie ogólne związane z zagadnieniem uwiarygodnienia pomiarów w technice cieplnej za pomocą metod rachunku wyrównawczego. Do osiągnięć tych należy zaliczyć:

- przeprowadzenie dowodu charakterystycznej własności macierzy kowariancji pomiarów po uwiarygodnieniu polegającej na tym, że ślad macierzy będącej iloczynem macierzy kowariancji pomiarów (w przypadku uogólnionej metody uzgadniania obejmującej również niepewności oszacowania niewiadomych) zadanej do obliczeń wyrównawczych i macierzy odwrotnej do macierzy kowariancji pomiarów po uwiarygodnieniu jest dla danego zadania wyrównawczego wielkością stałą zależną wyłącznie od liczby danych pomiarowych i wielkości niewiadomych oraz liczby równań warunków; dla diagonalnej postaci macierzy kowariancji pomiarów zadanej do obliczeń wyrównawczych własność ta pozwala ocenić w sposób całościowy stopień zmniejszenia niepewności pomiarów po uwiarygodnieniu; dla uogólnionej metody uzgadniania własność ta udowadnia, że zarówno niepewności pomiarów, jak i niewiadomych po uwiarygodnieniu ulegają zmniejszeniu; w oparciu o udowodnioną własność wprowadzono do analiz wskaźnik charakteryzujący w sposób całościowy zmniejszenie wariancji pomiarów po uwiarygodnieniu;
- wprowadzenie do metodyki rozwiązywania zadań wyrównawczych kryterium dołączania dodatkowych równań warunków, wielkości pomiarowych i wielkości mających status pseudopomiaru w uogólnionej metodzie uzgadniania; kryterium tym jest wartość wprowadzonej do rozważań średniej ważonej wariancji zmiennych procesowych (pomiarów i niewiadomych) po uwiarygodnieniu opartej na przedstawionej charakterystycznej własności macierzy kowariancji pomiarów;
- zastosowanie udoskonaleń w zakresie numerycznego rozwiązywania nieliniowych zadań wyrównawczych za pomocą metody nieoznaczonych czynników *Lagrange'a* w celu uzyskania zbieżności procedur iteracyjnych; udoskonalenia te umożliwiają

ponadto przeprowadzenie uwiarygodnienia pomiarów na poziomie parametrów termicznych dla zadań wyrównawczych, w których składnikami równań warunków są funkcje kaloryczne;

- zastosowanie metod wnioskowania rozmytego do całościowej oceny wektora statystyk testowych poprawek wyników pomiarów uwzględniającej różnicę pomiędzy wartościami uzyskanych statystyk testowych poprawek pomiarów i wartością krytyczną testu.

Druga grupa osiągnięć i oryginalnych rozwiązań autora dotyczy natomiast zagadnień związanych z uwiarygodnieniem pomiarów w układzie cieplnym bloku energetycznego. Do osiągnięć tych można zaliczyć:

- zastosowanie symulacyjnego modelu matematycznego procesu do obliczania referencyjnych wartości pomiarów w identyfikacji błędów grubych pomiarów oraz ich zastosowanie, jako obliczeniowych wartości zastępczych, w metodzie uzgadniania,
- zastosowanie uogólnionej metody uzgadniania bilansów z estymacją wielkości niewiadomych za pomocą funkcji empirycznych opracowanych na podstawie zarchiwizowanych danych pomiarowych lub wyników pomiarów specjalnych oraz zastosowanie metod estymacji przedziałowej do oceny niepewności oszacowania niewiadomych,
- rozbudowa układu równań warunków – modelu walidacyjnego rozwiązywanego zadania wyrównawczego o dodatkowe równania opisujące proces konwersji energii w turbinie parowej oraz przepływ ciepła w wymiennikach regeneracyjnych w celu spełnienia przez uwiarygodnione pomiary zasady wzrostu entropii w zachodzących procesach konwersji energii,
- zastosowanie wprowadzonej do rozważań średniej ważonej wariancji zmiennych procesowych (pomiarów i niewiadomych) po uwiarygodnieniu opartej na charakterystycznej własności macierzy kowariancji pomiarów do doboru postaci dodatkowych równań modelu walidacyjnego,
- zastosowanie przesłanek fizykalnych w metodzie wstępnego oszacowania wartości i niepewności tego oszacowania dla entalpii pary wylotowej z turbiny kondensacyjnej do skraplacza,
- opracowanie metodyki doboru optymalnej lokalizacji dodatkowych nadmiarowych pomiarów w układzie cieplnym bloku z zastosowaniem rachunku wyrównawczego i metod programowania stochastycznego.

Do osiągnięć pracy należy również jej charakter utylitarny. Opracowana w pracy metodyka uwiarygodnienia pomiarów w układzie cieplnym bloku oraz wybrane rozwiązania przedstawione w pracy zostały praktycznie wykorzystane we wdrożonych komputerowych systemach wspomagania decyzji w zakresie technicznej kontroli eksploatacji bloków energetycznych. Wdrożenia te obejmują wybrane bloki energetyczne elektrowni PGE S.A oraz PKE S.A.